

Simulation des Wasserflusses in jungen Traubeneichen (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) unter Verwendung von Architekturdaten



DFG-Projekt Az.: SL 11/8-2

Projekzeitraum: 01.04.1999 - 31.08.-2002

Antragsteller: B. Sloboda, Ch. Leuschner

Ausführung: T. Früh, M. Schulte

Institut für Forstliche Biometrie und
Informatik der Universität Göttingen



Dr. Michael Schulte

mi-schu@t-online.de

Einführung

Der Prozeß der pflanzlichen Wasserabgabe (Transpiration) beginnt mit der Wasserabsorption der Wurzeln und führt über den Ferntransport durch die Leitgewebe (Xyleme) in Sproß und Blättern schließlich zur stomatären Wasserdampfabgabe in die umgebende Luft. Die primäre antreibende Kraft dieses Prozesses ist die Wasserpotentialdifferenz zwischen Boden und Atmosphäre. Das Wasser bewegt sich durch ein *Soil-Plant-Atmosphere-Continuum* (SPAC) entlang eines Gradienten abnehmenden Wasserpotentials. Ziel dieses Vorhabens ist es, Wasserpotentiale und Wasserflüsse in Waldbäumen in Abhängigkeit von morphologischen Strukturen, hydraulischen Leitfähigkeiten und Mikroklima anhand eines Modells zu simulieren.

Die Entwicklung des Wasserfluss-Simulationsmodells HYDRA wurde im Rahmen von zwei BMBF-Forschungsprojekten ("Stabilitätsbedingungen von Waldökosystemen,," und "Veränderungsdynamik von Waldökosystemen,,") für die Anwendung auf Nadelbäume begonnen und in dem DFG-Projekt („Numerische Simulation des hydraulischen Systems Baum-Boden bei der Traubeneiche (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.)“ für Laubbäume weiterentwickelt. Zur Erzeugung morphologischer Strukturmodelle wurde das Programmsystem GROGRA (*Growth Grammar Interpreter*) von Winfried Kurth verwendet, das die systematische Erzeugung diverser Baumarchitekturvarianten ermöglicht.

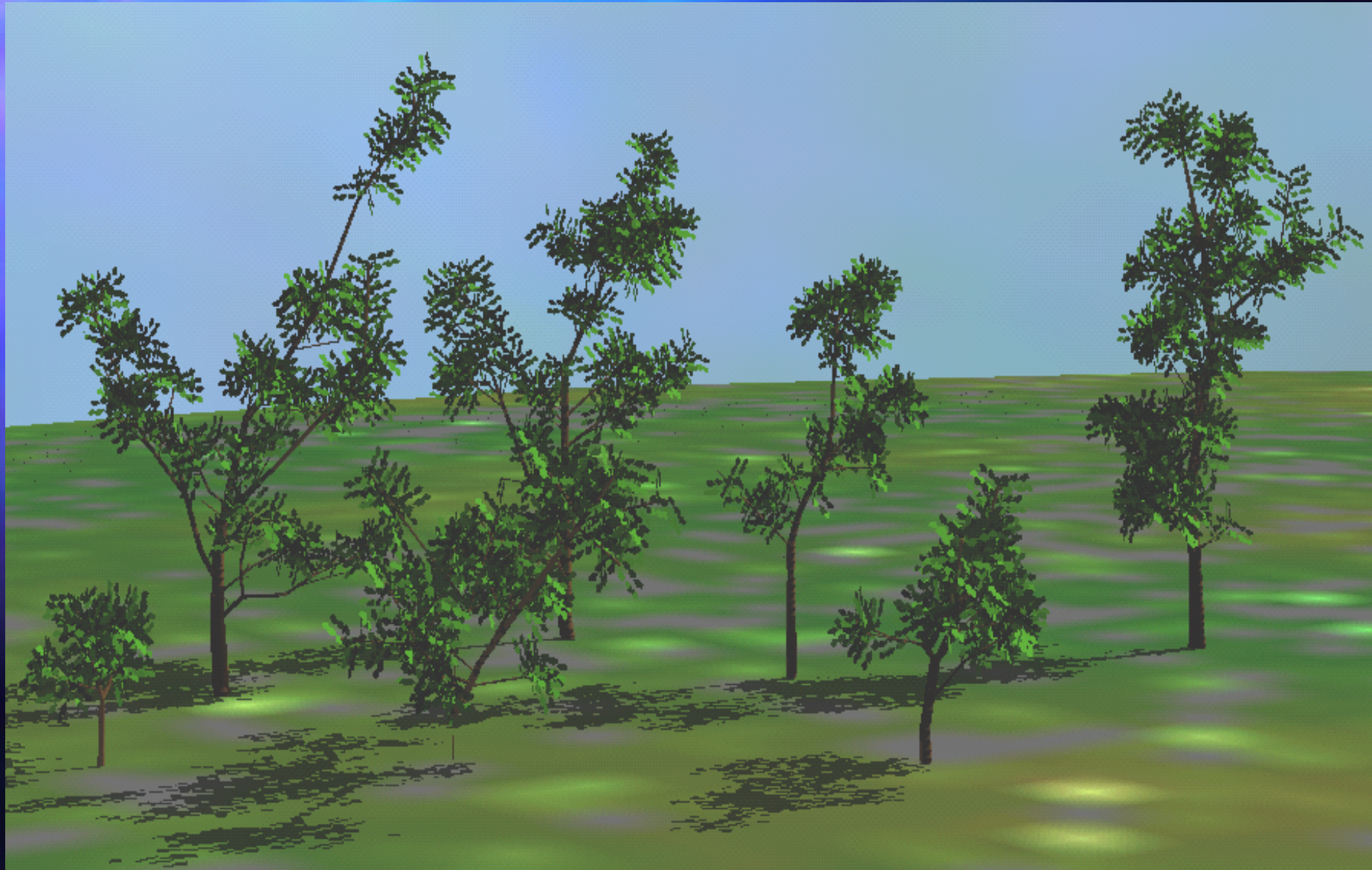
Im Rahmen des hier behandelten Projektes bestand die Aufgabe, die für Nadelbäume entwickelte HYDRA-Version unter Berücksichtigung der veränderten Anforderungen an die Laubbaumart Traubeneiche (*Quercus petraea*) programmtechnisch anzupassen und neu zu parametrisieren. Hierzu war erstmals die Modellierung von Blättern (Blattspreiten, Blattstiele) als eigenständige Strukturelemente notwendig, deren transpirierende Oberflächen in der Koniferenversion von HYDRA noch Segmenten der sie tragenden Sproßachse zugeordnet waren. Auch das Wurzelsystem war in der alten Version noch unberücksichtigt geblieben, weil aufgrund der Rückkopplung zwischen Wurzelwasseraufnahme und den hydraulischen Variablen der Bodenumgebung der Weg einer verzweigungsorientierten Modellierung als zu aufwendig erschien. Deshalb war es sinnvoll, die Komplettierung eines bereits begonnenen Ansatzes zur Koppelung von HYDRA mit einem Bodenwasserfluß-Modell (*siVlow*) in die Planung einzubeziehen.

Zur Parametrisierung der Laubbaumversion von HYDRA für die Traubeneiche waren umfangreiche empirische Datenerhebungen notwendig. Diese umfassten aufwendige Kartierungsarbeiten zur Kronen- und Wurzelarchitektur und Laboruntersuchungen zur axialen hydraulischen Leitfähigkeit von Stamm-, Ast-, Zweig- und Blattsegmenten sowie an Wurzeln von jungen Traubeneichen. Um eine Konsistenzprüfung des Modells zu ermöglichen, waren einerseits ergänzende Freilandmessungen des Mikroklimas, der Xylemsaftflüsse, Blattleitfähigkeiten, Transpirationsraten, Blattwasserpotentiale, und andererseits die Neuentwicklung und Parametrisierung eines Teilmodells zur Berechnung von Blattleitfähigkeiten und Transpirationsraten erforderlich.

Themen

- 1) Struktur der Testbäume, generiert mit AMAP
- 2) Basisannahmen von HYDRA
- 3) Vereinfachungen bei HYDRA
- 4) Hydraulische Leitfähigkeiten, *cavitation functions*
- 5) Multiplikatives Stomata-Leitfähigkeitsmodell
- 6) Empirische Daten: Wasserpotentiale und Saftflüsse
- 7) Simulationsmodi: der Schalter EVA-SWITCH
- 8) Ergebnisse: Simulation von Wasserpotential und Wasserfluss
- 9) Zusammenfassung
- 10) Ausblicke

Struktur der Testbäume, generiert mit AMAP



Basisannahmen von HYDRA

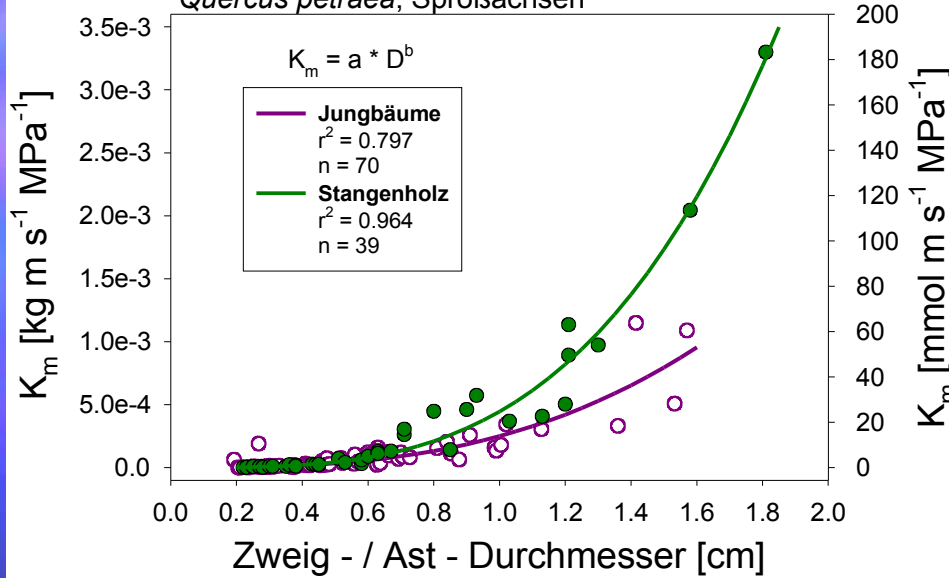
- **Wasserpotential** $\Psi = P + \rho_{\text{H}_2\text{O}} g z (-\pi^*) (-\tau^*)$ [Pa]
- **Darcy-Gesetz** $F = K_m (\partial \Psi / \partial x)$ [kg s⁻¹]
- ***Cavitation function*** $f(P(t)) = 1 - [K(P(t)) / (K(0))]$ [-]
- **Hydraulische Kapazität** $c(P) = (\partial \theta / \partial \Psi)$ [kg m⁻³ Pa⁻¹]
- **Räumliche Homogenität von Leitfähigkeit und hydraulischer Kapazität**
- **Massenerhaltung**

Vereinfachungen bei HYDRA

- Transpiration (*sink*) ist für jedes Einzelblatt (noch) ein räumlich homogener Prozess (keine Kronengradienten)
- (Noch) keine Rückkopplung des Xylem-Wasserpotentials mit der stomatären Leitfähigkeit
- (Noch) keine Berücksichtigung der hydraulischen Leitfähigkeiten des Wurzelsystems

Empirie: Hydraulische Leitfähigkeiten (Zweige und Blattstiele)

Quercus petraea, Sprossachsen



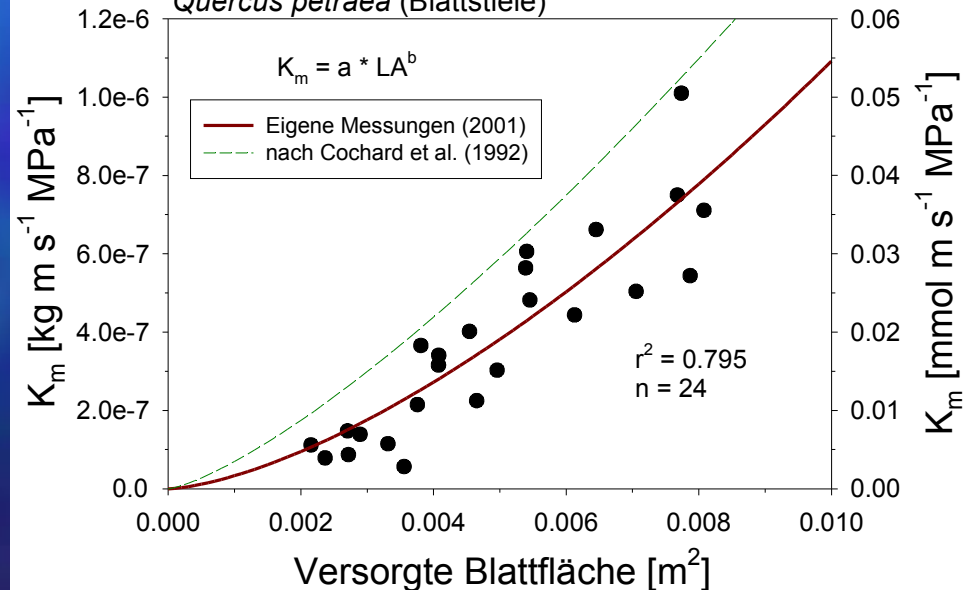
Hydraulische Leitfähigkeit der Sprossachsen in Abhängigkeit von ihrem Durchmesser



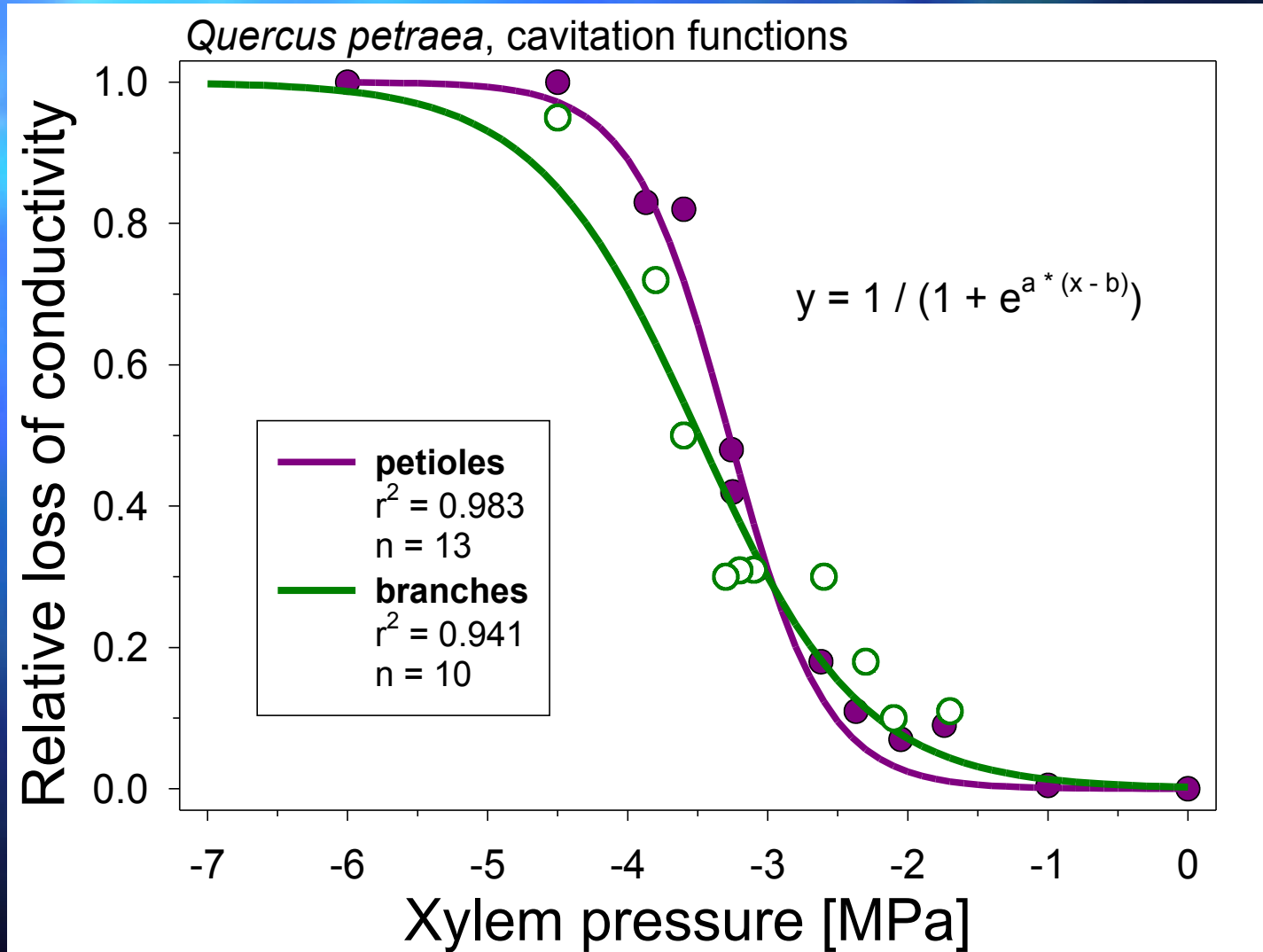
Hydraulische Leitfähigkeit der Blattstiele in Abhängigkeit von der versorgten Blattfläche



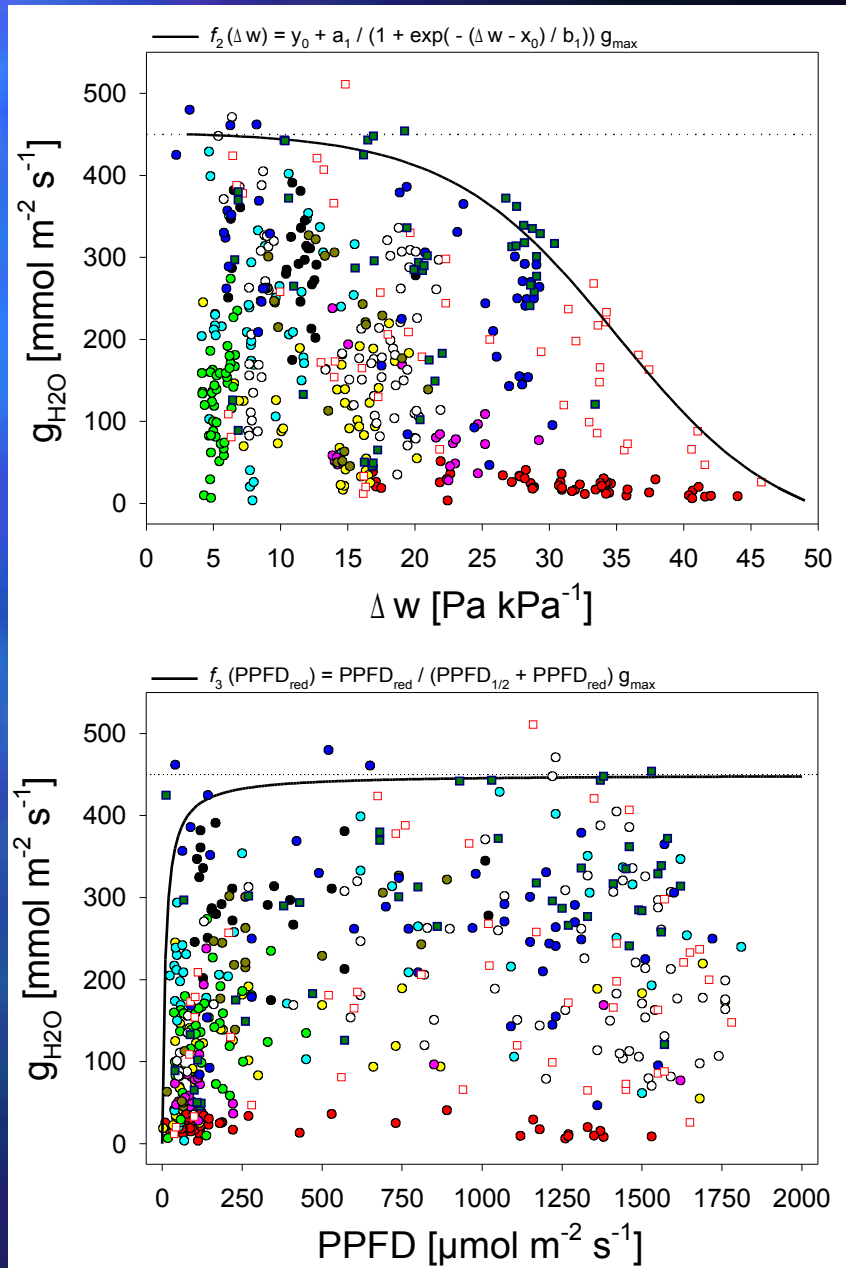
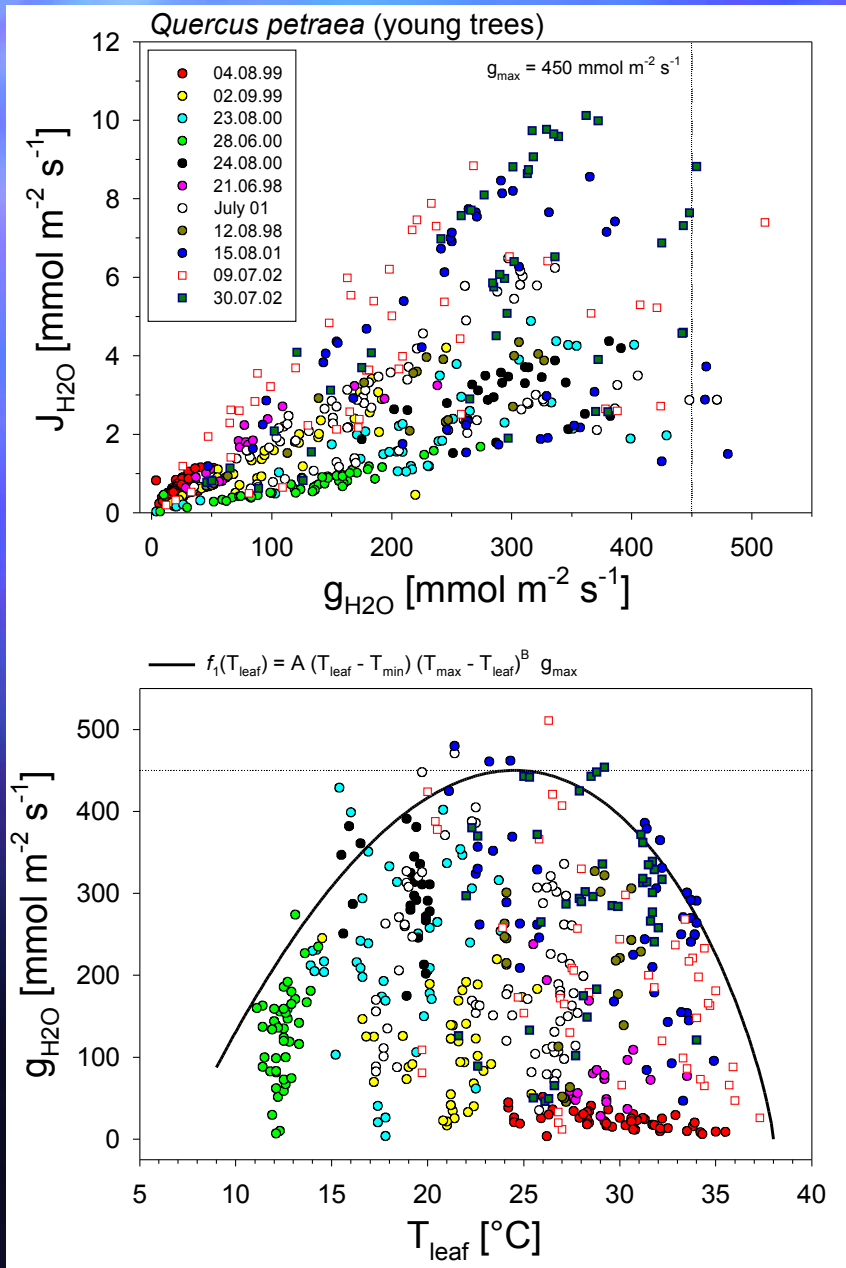
Quercus petraea (Blattstiele)

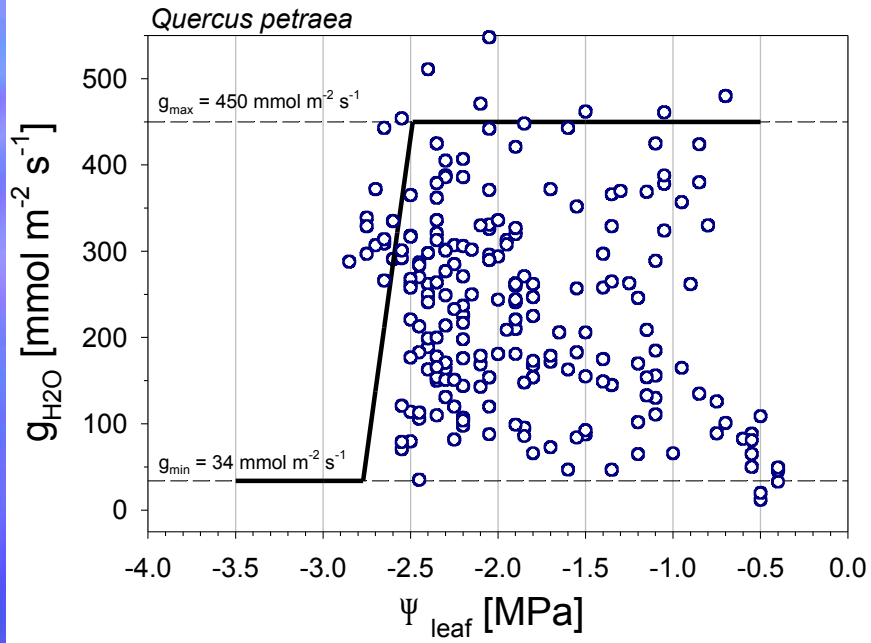


Empirie: *cavitation functions* (Verwundbarkeitskurven) von Zweigen und Blattstielen

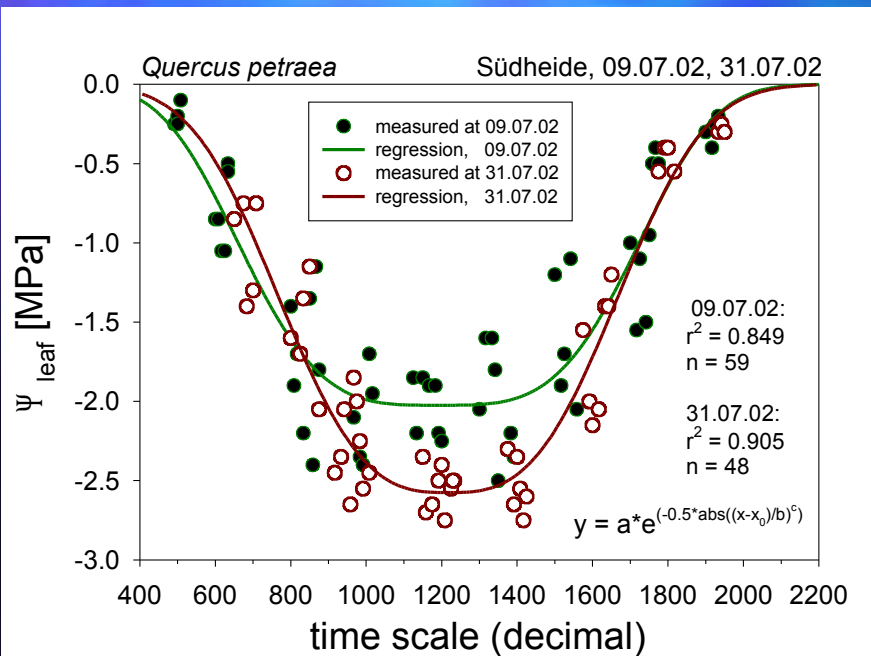


Empirie: Multiplikatives Stomata-Leitfähigkeitsmodell





Empirie: Hüllkurve (*boundary line analysis*) zur Beschreibung der Blattleitfähigkeit in Abhängigkeit vom Blattwasserpotential



Empirie: Tagesgänge des Blattwasserpotentials an zwei ausgewählten Sommertagen (9. Juli und 31. Juli 2002)

Gesamtfunktion des Teilmodells: stomatäre Leitfähigkeit

$$g_{\text{H}_2\text{O}} = g_{\text{max}} f_1(T_{\text{leaf}}) f_2(\Delta w) f_3(\text{PPFD}_{\text{trans}}) f_4(\Psi_{\text{leaf}}) \quad \text{mit } g_{\text{max}} = 450 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

Transpirationsrate (Transportgleichung)

$$J_{\text{H}_2\text{O}} = g_{\text{H}_2\text{O}} \Delta w \quad [\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}]$$

Temperaturabhängigkeit

$$f_1(T_{\text{leaf}}) = A (T_{\text{leaf}} - T_{\text{min}}) (T_{\text{max}} - T_{\text{leaf}})^B$$

Luftfeuchteabhängigkeit

$$f_2(\Delta w) = y_0 + a_1 / (1 + e^{-(\Delta w - x_0) / b_1})$$

Strahlungsabhängigkeit

$$f_3(\text{PPFD}_{\text{trans}}) = \text{PPFD}_{\text{trans}} / (\text{PPFD}_{1/2} + \text{PPFD}_{\text{trans}})$$

Höhenabhängige (transmittierte) Strahlung

$$\text{PPFD}_{\text{trans}} = \text{PPFD} e^{(-k (h_{\text{tree}} - h_{\text{leaf}}))}$$

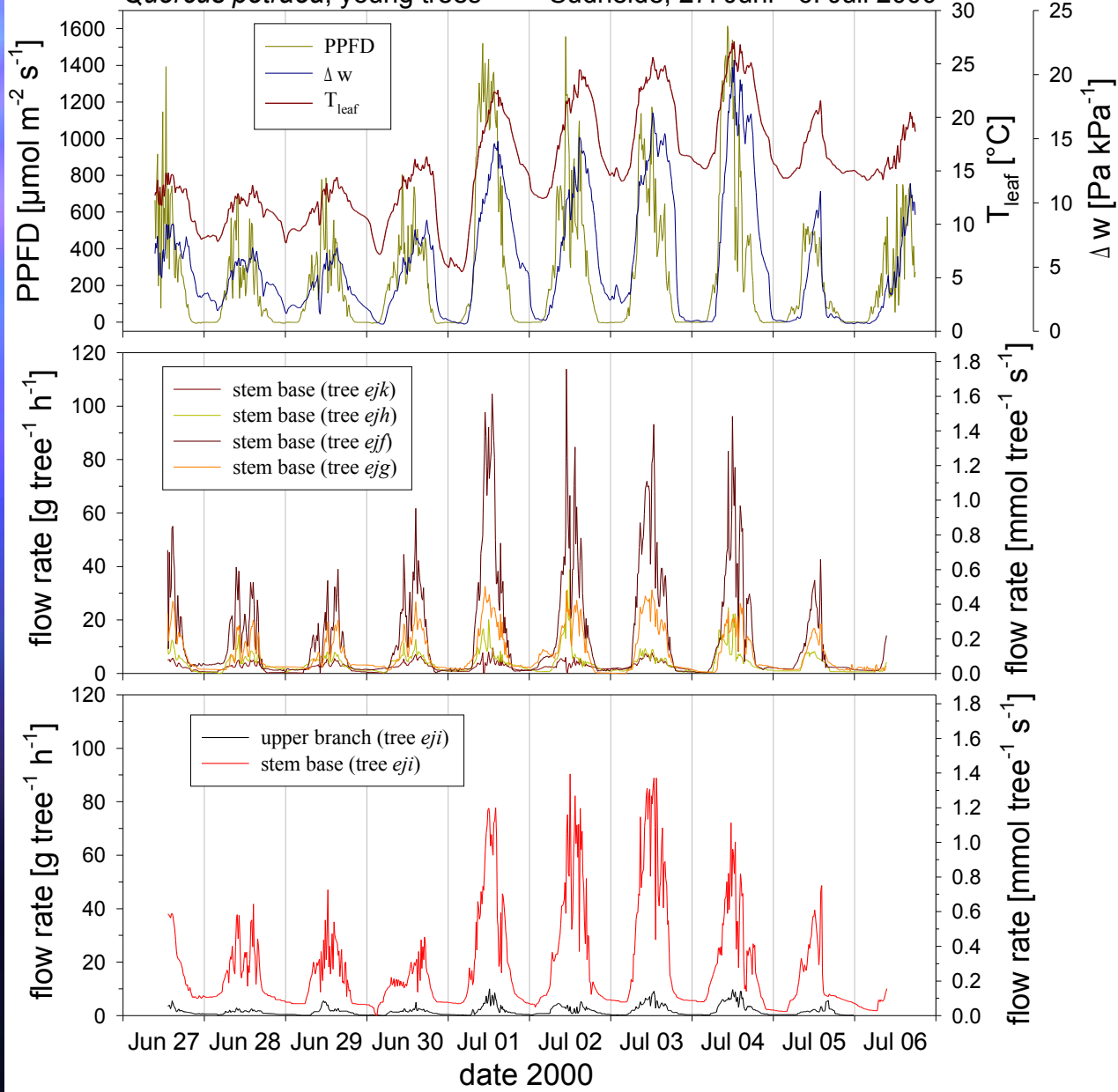
Abhängigkeit vom Blattwasserpotential

$$f_4(\Psi_{\text{leaf}}) = ((\text{if } \Psi_{\text{leaf}} \geq \Psi_{\text{up}} \text{ then } f(\Psi_{\text{leaf}}) = 1)$$

$$\text{else if } (\Psi_{\text{leaf}} \leq \Psi_{\text{down}} \text{ then } f(\Psi_{\text{leaf}}) = g_{\text{min}} / g_{\text{max}})) \text{ else } f(\Psi_{\text{leaf}}) = a + b \Psi_{\text{leaf}}$$

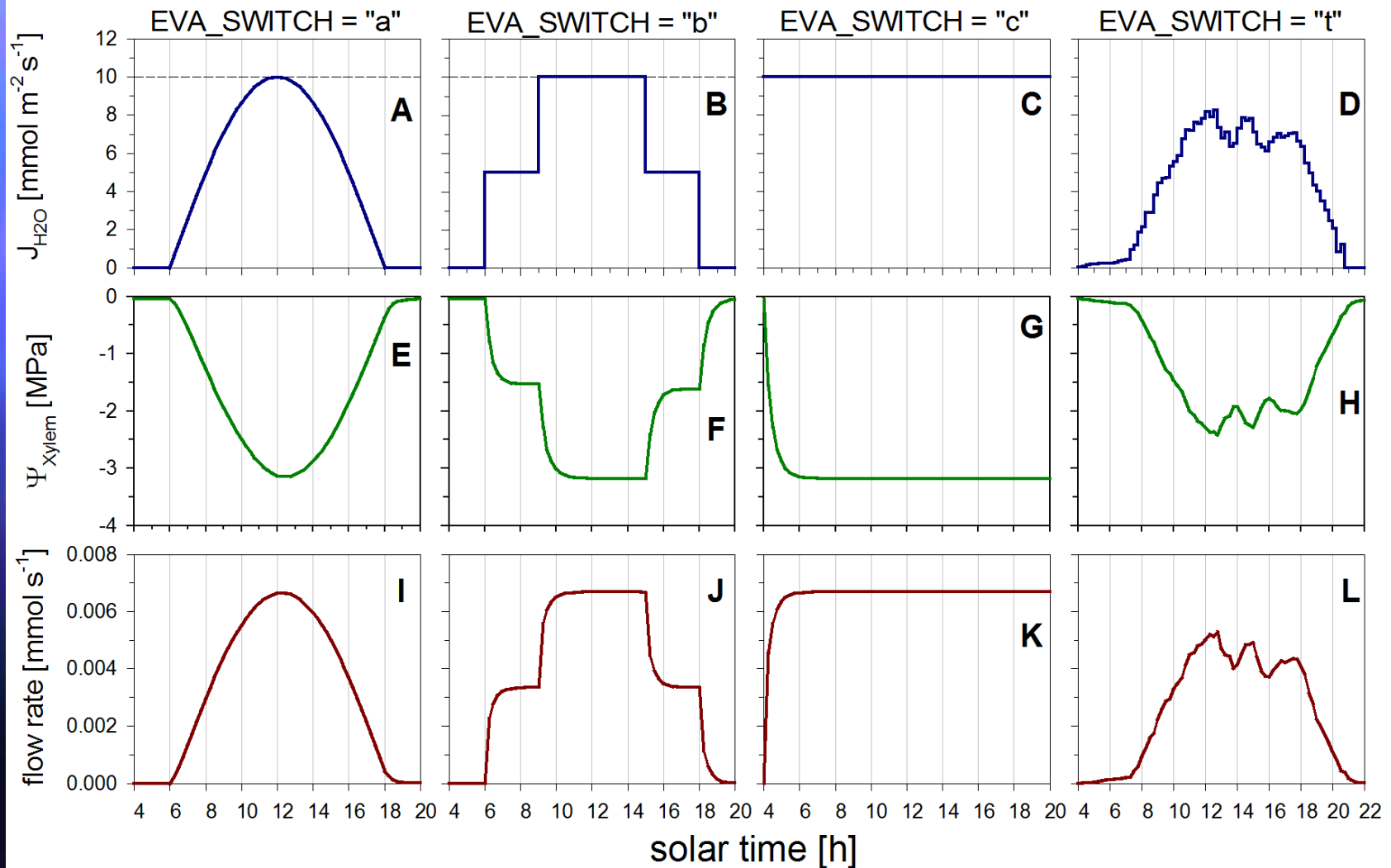
Tagesgänge des Blattwasserpotentials

Quercus petraea, young trees Südheide, 27. Juni - 6. Juli 2000

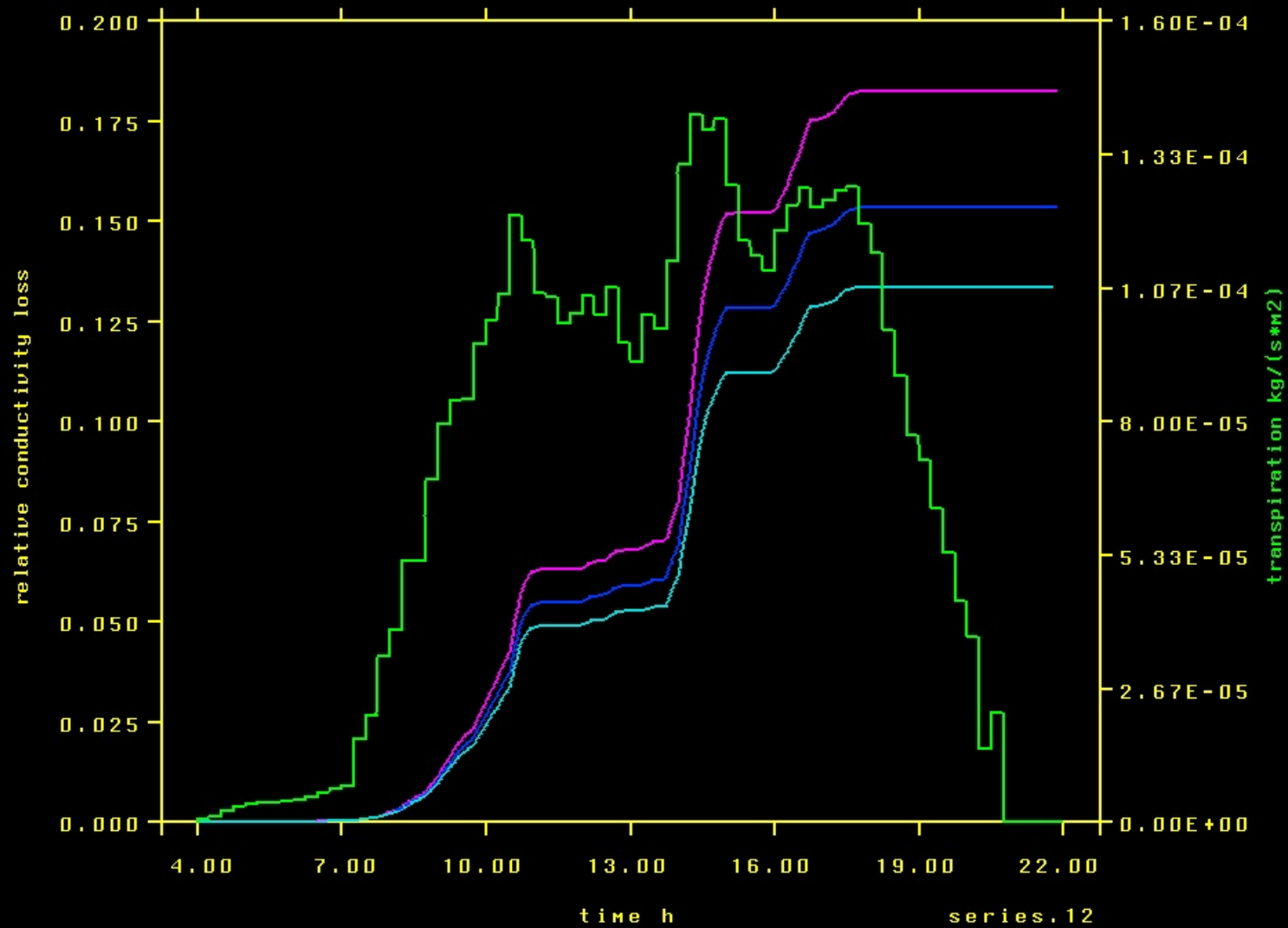


Empirie: Mikroklima und Saftflussraten von fünf *Quercus*-Jungbäumen (*ejf*, *ejg*, *ejh*, *eji*, *ejk*), gemessen auf der Versuchsfläche in der Südheide bei Unterlüß

Simulationsmodi: Auswirkungen des HYDRA-Schalters EVA-SWITCH auf Transpirationsrate, Wasserpotential und Flussrate

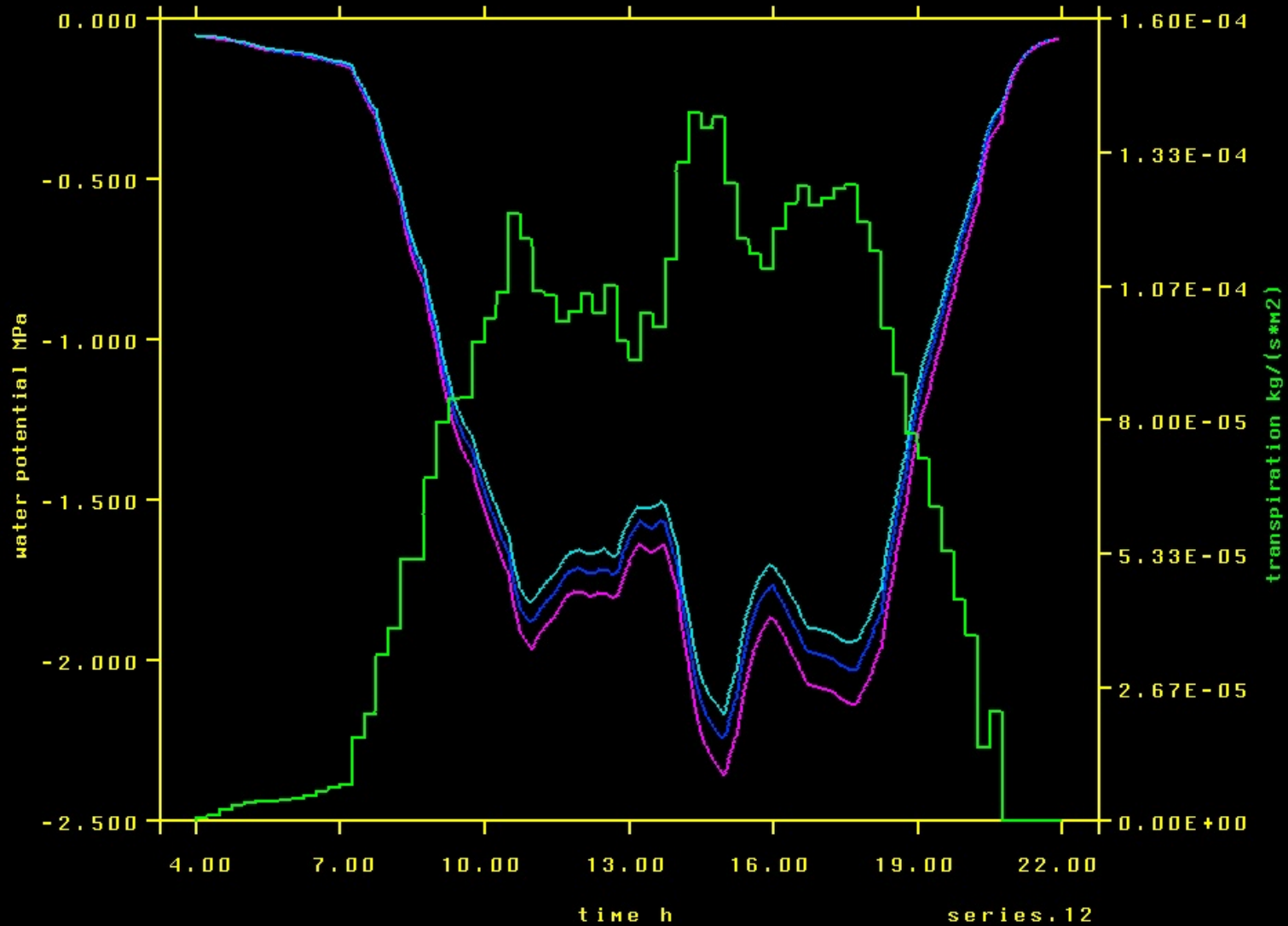


Simulation: Relativer Leitfähigkeitverlust von 3 ausgewählten Blattknoten im Verlauf eines Tages



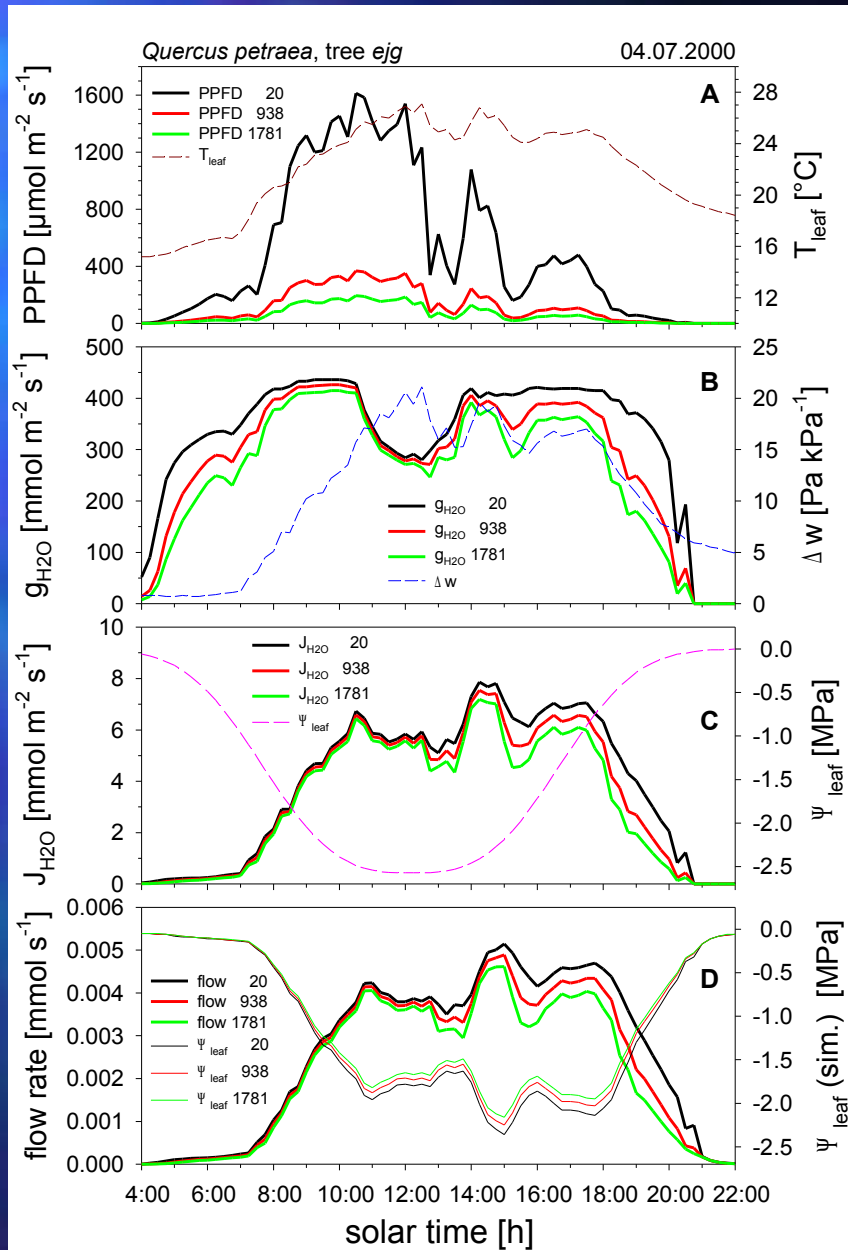
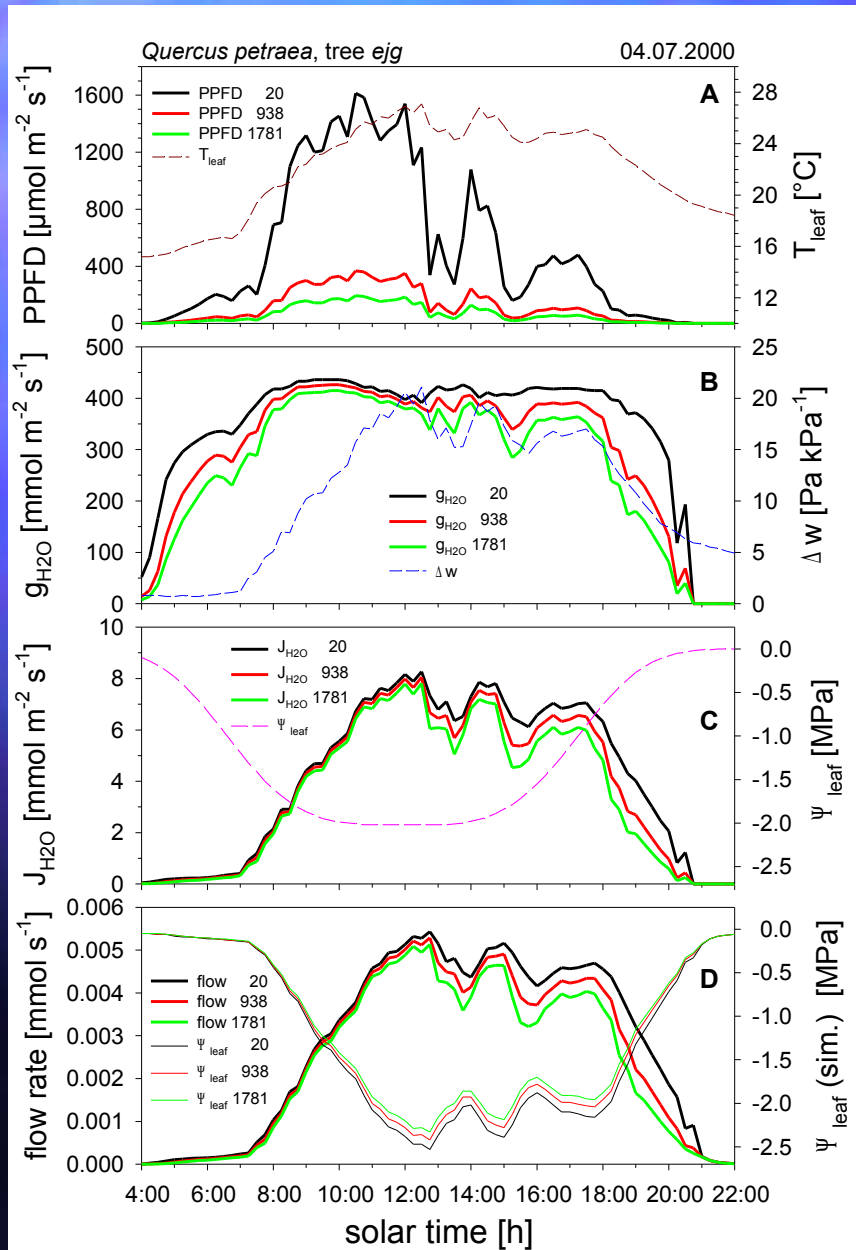
20 938 1781

Simulation: Wasserpotential von 3 ausgewählten Blattknoten des Baumes *ejg* im Verlauf eines Tages

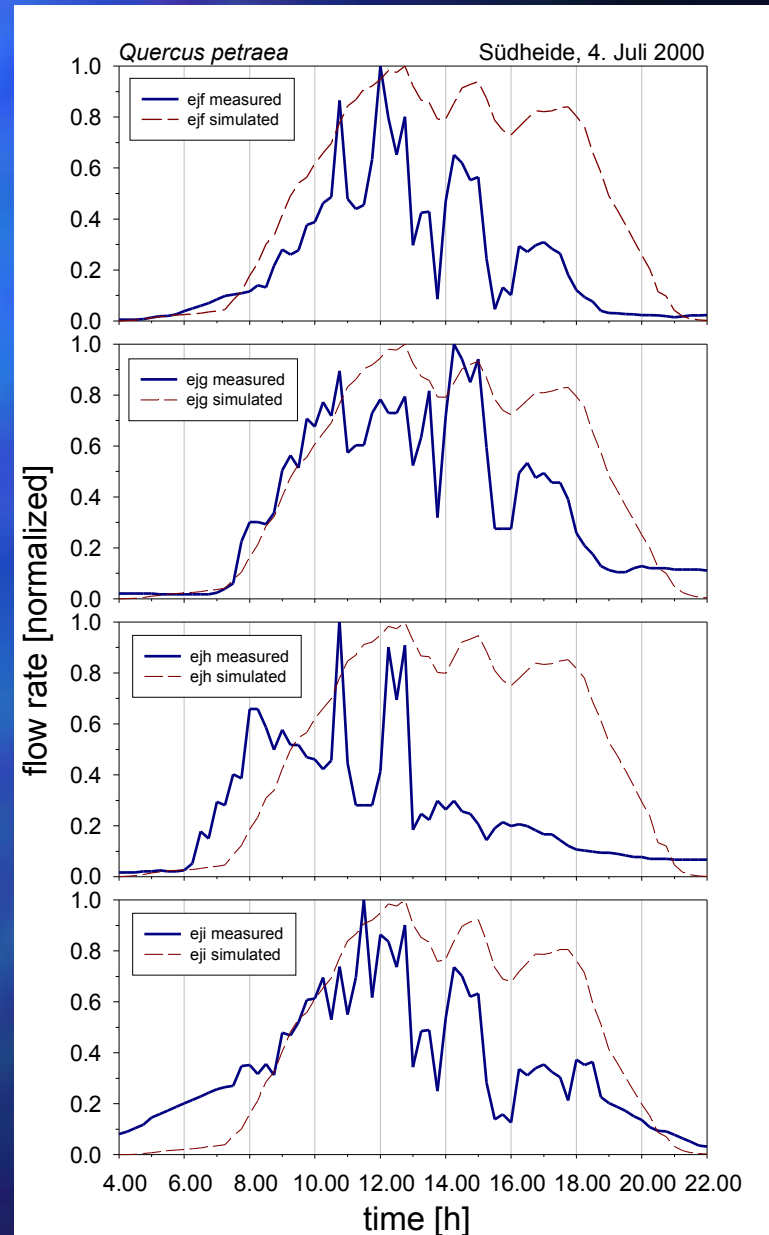
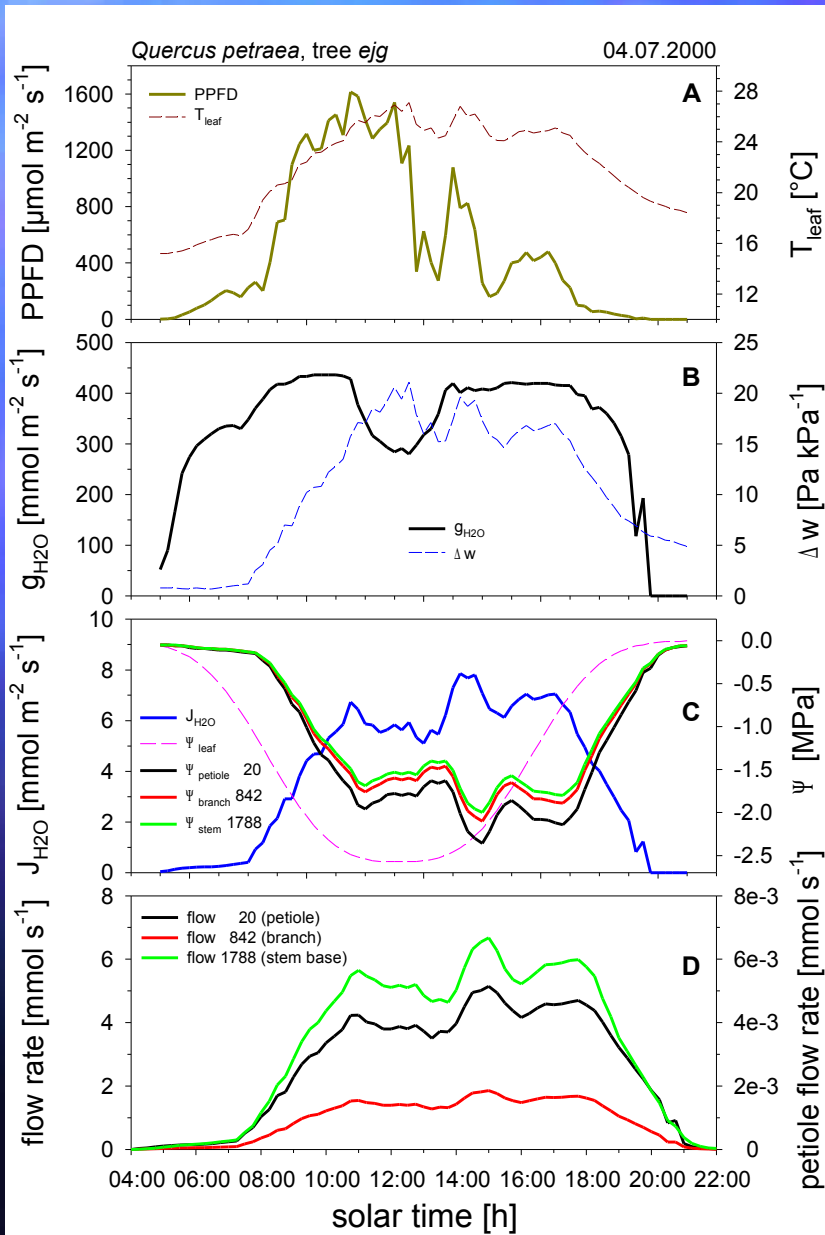


20 — 938 — 1781 —

Simulation: Wasserpotentiale und Wasserflüsse in 3 ausgewählten Blattknoten des Baumes *eig* oberhalb (links) und unterhalb (rechts) der Kavitations-Schwelle



Simulation: Ergebnisse für Blattstiel, Ast und Stammbasis; Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Wasserflüssen



Zusammenfassung

Mit HYDRA wird ein Modell zur Simulation des Wasserflusses in der verzweigten Baumarchitektur vorgestellt, das hydraulische und morphologische Komponenten miteinander verbindet. Gegenüber anderen Flussmodellen folgt HYDRA konsequent physikalischen Gesetzen und physiologischen Vorgaben. Das beweisen ausführliche Modelltests.

Zu den Besonderheiten von HYDRA zählen sowohl die konsequente Anwendung des Darcy-Gesetzes, des Prinzips der räumlichen Homogenität von Kapazität und axialer Leitfähigkeit und der Massenerhaltung.

HYDRA bietet die Möglichkeit, Kavitationsereignisse (Embolien) im wassergefüllten Xylem unter Wasserstressbedingungen zu simulieren.

Ausblicke

- Stomata-Submodell:
Modifizierung und Optimierung
- Bodenwassermodell:
Verbesserte Parametrisierung
- Wurzelsystem:
„Nahtlose“ Anpassung an die Hydraulik des
Spross-Systems